

ÉRTEKEZÉSEK EMLÉKEZÉSEK

CSIKAI GYULA

A GYORS-
NEUTRON-ADATOK
ÉS A FÚZIÓS REAKTOROK



56

AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

ÉRTEKEZÉSEK
EMLÉKEZÉSEK

ÉRTEKEZÉSEK EMLÉKEZÉSEK

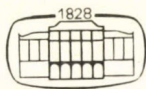
SZERKESZTI
TOLNAI MÁRTON

CSIKAI GYULA

A GYORS-
NEUTRON-ADATOK
ÉS A FÚZIÓS REAKTOROK

AKADÉMIAI SZÉKFOGLALÓ

1986. JANUÁR 29.



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

A kiadványsorozatban a Magyar Tudományos Akadémia 1982.
évi CXLII. Közgyűlése időpontjától megválasztott rendes és
levelező tagok székfoglalói — önálló kötetben — látnak
napvilágot.

A sorozat indításáról az Akadémia főtitkárának 22/1/1982.
számú állásfoglalása rendelkezett.

ISBN 963 05 4499 7

© Akadémiai Kiadó, Budapest 1987 — Csikai Gyula

Printed in Hungary

„Négy ezredév után a nap kihűl,
 Növényeket nem szül többé a föld;
 Ez a négy ezredév hát a mienk,
 Hogy a napot pótolni megtanuljuk.
 Elég idő tudásunknak, hiszem.
 Fűtőszerűl a víz ajánlkozik,
 Ez oxidált, legtűztartóbb anyag.”

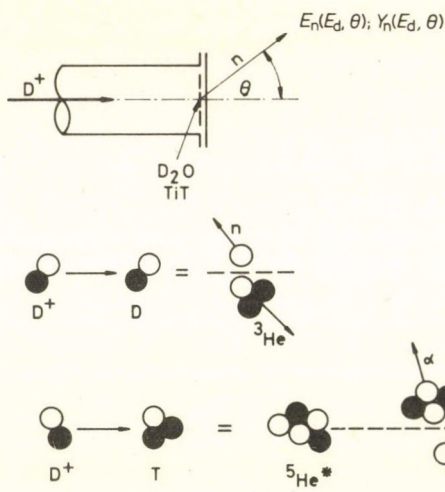
(Madách I.: Az ember tragédiája, 1862)

A neutron, 1932-ben történt felfedezésétől kezdve alapvető szerepet játszott az atommag szerkezetének és a magerők tulajdonságainak megismerésében, csakúgy mint a nukleáris technológia megalapozásában. A ma rendelkezésünkre álló széles neutronenergia-tartomány, ami 17 nagyságrendet fog át 10^{-7} és 10^{10} eV között, lehetővé teszi az anyagszerkezet tanulmányozását a makromolekuláktól és kristályoktól a nukleonokig.

A de Broglie-összefüggésből

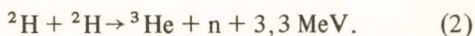
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \left(\frac{h^2}{2mE} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

a fenti két energiánál a neutron hullámhosszára $3,6 \times 10^{-6}$ cm, illetve $1,14 \times 10^{-14}$ cm értéket kapunk, vagyis az intervallum néhány száz atom méretétől a nukleon kb. tized részéig terjed.



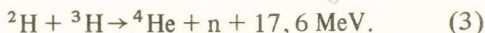
1. ábra. A D-D és a D-T reakciók létrehozásának elve

A néhányszor 100 kV-os neutrongenerátorok jelentősen hozzájárultak mind a magfizikai alap kutatások eredményeihez, mind a nukleáris módszerek gyakorlati alkalmazásaihoz. Az első neutrontermelő reakciót kisfeszültségű gyorsítóval az Oliphant–Harteck–Rutherford csoport hozta létre 1934-ben. Lefagyasztott nehézvizet bombáztak deutériumionokkal. A híres D-D reakció a következő (1. ábra):

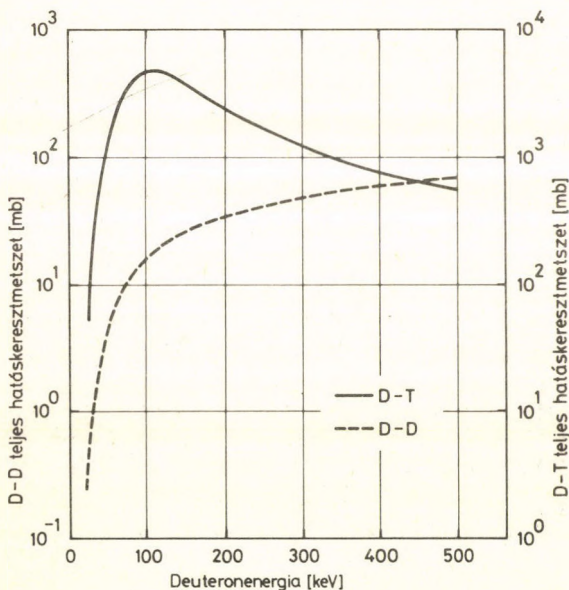


Ezen kis generátorok továbbfejlesztésében az 1949. év döntő fordulatot jelentett, ugyanis ekkor került forgalomba a szilárd trícium cél-

tárgy, amelynél a trícium gázt titán vagy cirkónium fémekben abszorbeáltatták. Ezek a fémek atomonként közel két tríciumot kötnek meg úgy, hogy a bomlási hőmérséklet meghaladja az $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ értéket. Ilyen céltárgyakat deutériumionokkal bombázva az ún. D-T reakció jön létre:



A reakció 14 MeV körüli energiával rendelkező neutronokat eredményez, amihez $7,6 \times 10^{-13}\text{ cm}$ hullámhossz tartozik. Ez összemérhető az



2. ábra. A D-D és a D-T reakciók gerjesztési függvénye

	$N-2$	$N-1$	N	$N+1$
Z	$(n, 3n)$	$(n, 2n)$	Eredeti mag $(n, n' \gamma)$	(n, γ)
$Z-1$	(n, nt) $(n, t n)$	(n, t) (n, nd) (n, dn)	(n, d) (n, np) (n, pn)	(n, p)
$Z-2$	$(n, \alpha n)$ (n, n)	(n, α) $(n, {}^3\text{He } n)$ $(n, n {}^3\text{He})$	$(n, {}^3\text{He})$ (n, pd) (n, dp)	$(n, 2p)$

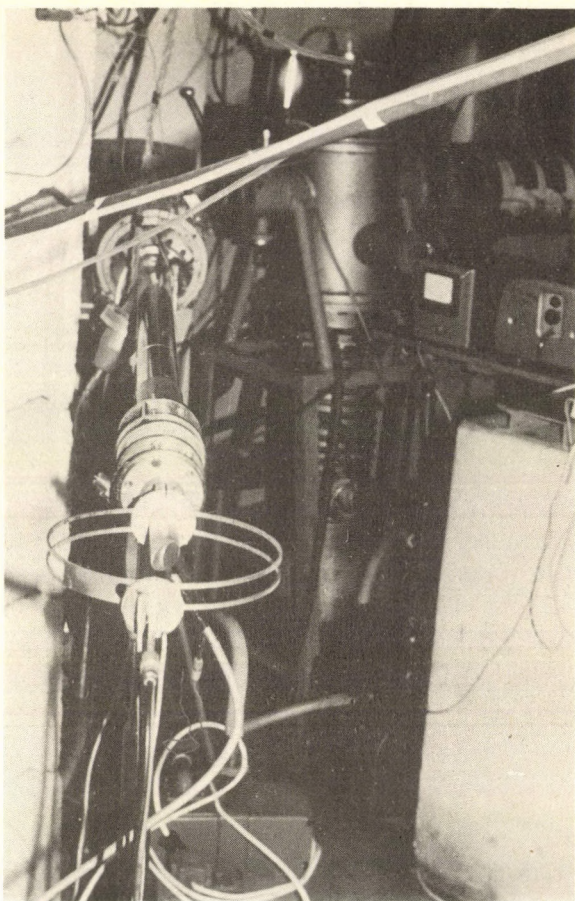
(n, f)
 $(n, n' f)$
 $(n, 2n f)$

3. ábra. A 14 MeV energiájú neutronokkal létrehozható atommagfolyamatok

atommagok átmérőjével. A D-D és D-T reakciók teljes hatáskeresztmetszetét (a folyamat valószínűségét) a bombázó deutériumionok energiájának függvényében a 2. ábra szemlélteti. Mint látható, a $\sigma(E_d)$ függvénynek a D-T reakció esetén 100 keV körül maximuma van, és a hatáskeresztmetszet kb. 250-szer nagyobb, mint a D-D folyamat esetén. Az ebből eredő nagy neutronhozam és a berendezés egyszerűsége eredményezte, hogy ma a világon sok száz kisméretű neutrongenerátor üzemel. Példaként megemlítem, hogy a D-T neutronokkal a 3. ábrán feltüntetett 18-féle atommagreakció hozható létre a közel 280 stabilis vagy hosszú életű izotópon, amelyek – a maghasadáستól eltekintve – mintegy 600

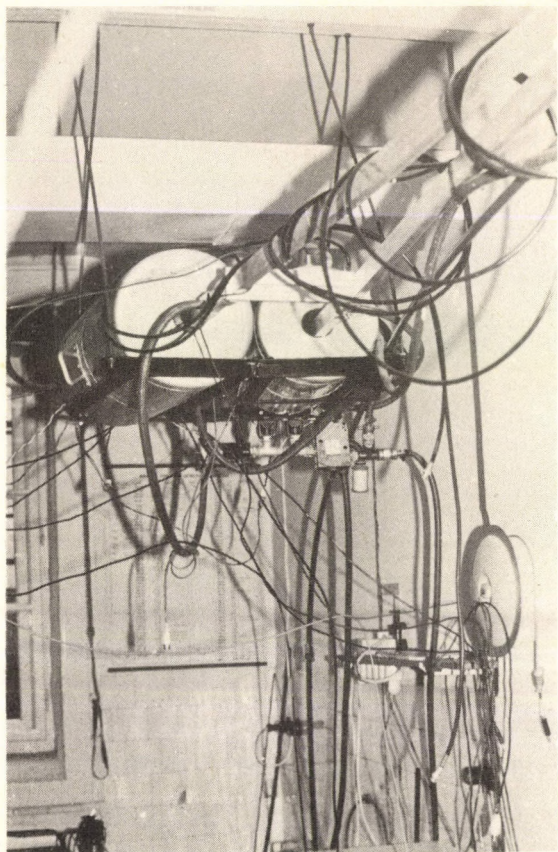
különböző radioaktív végtermékekhez vezetnek. Az egyes folyamatok differenciális és integrális hatáskeresztmetszetének, a kilépő részecskék energia- és szögeloszlásának mérése, a bomlássémák tanulmányozása tág teret nyit az atommagfizikai kutatások és a képzés számára. Ugyanakkor számos olyan gyakorlati alkalmazást is lehetővé tesz, mint pl. az aktivációs és prompt sugárzásos analízis, a reaktorszerkezeti anyagok sugárkárosodásának tanulmányozása, a sugárbiológiai és sugárterápiai alkalmazások, a neutronradiográfia, valamint a pulzált neutronkísérletek a neutrongázfizika, a reaktorfizika és a geológia terén.

Debrecenben Szalay Sándor akadémikus kezdeményezésére az 50-es évek elején kezdődött el a neutrongenerátorok építése. Az e téren elért fejlesztési és kutatási eredményekről 1973-ban számoltam be nyilvános osztályülésen, MTA levelező tagsági székfoglaló előadásomban. A KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékén az említett területek szinte mindegyikén folytak kutatások, jelentős részük a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel kötött szerződések keretében. A NAÜ, a Művelődési Minisztérium és az MTA támogatását is felhasználva, a tanszék munkatársaival egy olyan neutronfizikai laboratóriumot létesítettünk, amelyben jelenleg három különböző célú neutrongenerátor üzemel, és egy további építés alatt áll. A folytonos, analizált nyalábú generátorral (4. ábra) – viszonylag szórásmentes környezet-



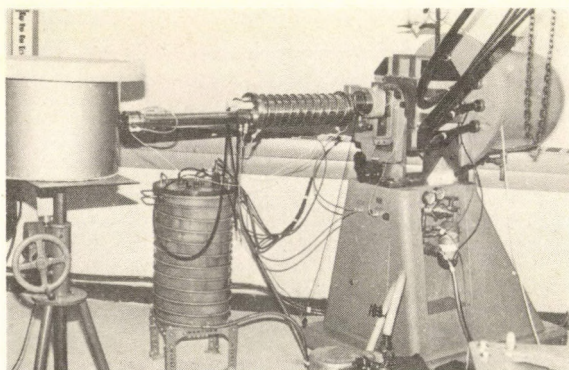
4. ábra. Az analizált nyalábú, saját építésű neutrongenerátor

ben — neutronindukált atommagreakciók hatáskeresztmetszetének mérése, valamint a maghasadási termékek tömeg-, töltés- és szög-



5. ábra. Csőpostarendszer gyorsneutron-aktivációs analízisre

eloszlásának vizsgálata történik, 14 MeV körüli energiákon. Ehhez a generátorhoz telepítettünk egy csőpostarendszert különböző gyakorlati alkalmazásokra (5. ábra). A mikrosze-

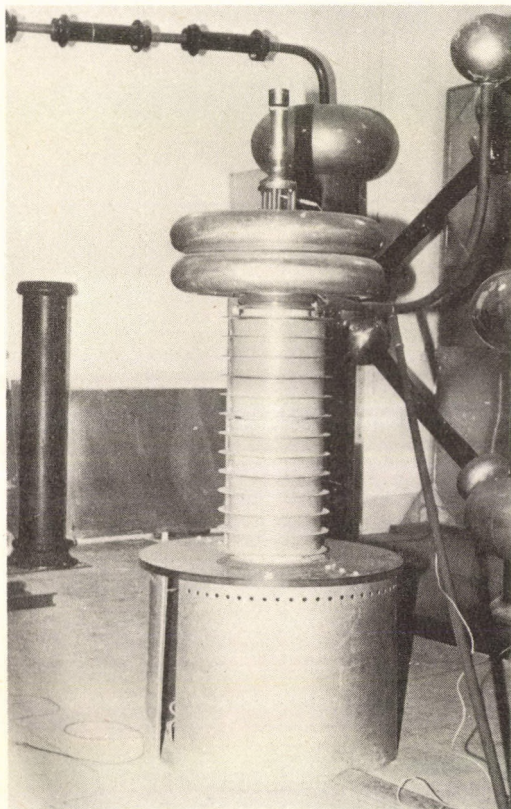


6. ábra. Impulzusüzemű neutrongenerátor
neutrongázfizikai vizsgálatokra

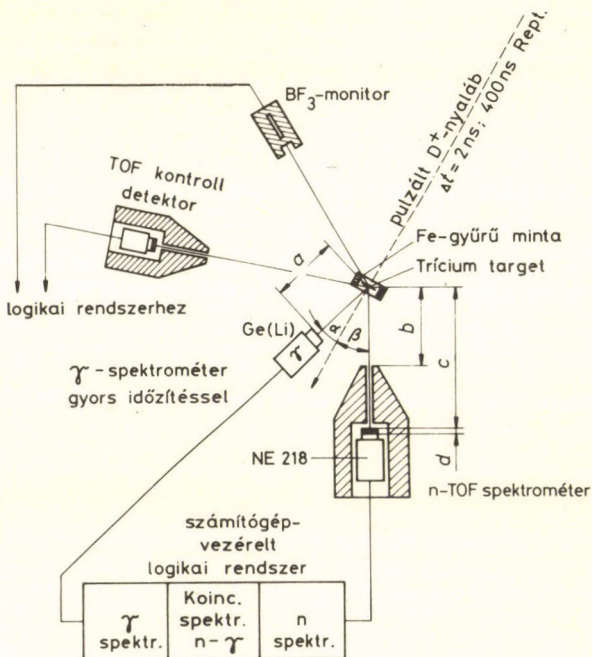
kundumos impulzusüzemű generátort (6. ábra) jelenleg nem lassító közegek termikus diffúziós paramétereinek meghatározására alkalmazzuk, amely adatok főleg a reaktorfizikai, valamint a geológiai és bányászati kutatások számára fontosak. A nanoszekundum időtartományban működő impulzus-neutrongenerátort (7. ábra) a magasan gerjesztett (≈ 20 MeV) magállapotok neutron- és gamma-emissziós tulajdonságainak tanulmányozására alkalmazzuk, különös tekintettel a különböző reaktorszerkezeti anyagokban lejátszódó folyamatokra. Az ehhez kapcsolódó mérőrendszer elvi felépítését a 8. ábra mutatja, amelyet az obnyinszki Atomenergia Intézettel együttműködésben valósítottunk meg. Ebben a fejlesztő munkában részünkről főleg Sztaricskai

Tibor, Vasváry László és Pető Gábor vettek részt.

Egy föld alatti laboratóriumban jelenleg építés alatt áll egy nagy intenzitású ($\approx 10^{12}$ n/s)



7. ábra. Nanoszekundumos üzemű, saját fejlesztésű neutrongenerátor neutron- és gamma-spektroszkópiai célra



$$\alpha = 17^\circ$$

$$\beta = 27^\circ$$

$$d = 6,0 \text{ cm}$$

$$a = 72,5 \text{ cm} \quad \Delta t = 6 \text{ ns}$$

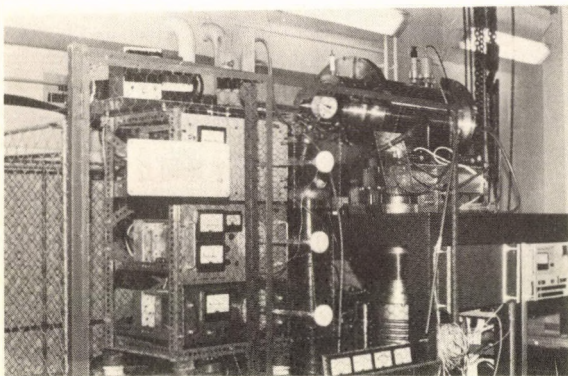
$$b = 75,5 \text{ cm}$$

$$c = 157,5 \text{ cm} \quad \Delta t = 2 \text{ ns}$$

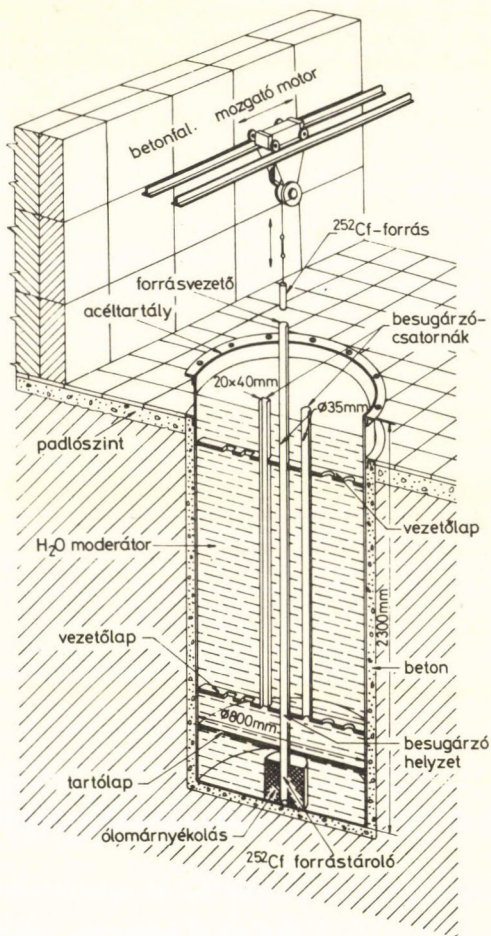
8. ábra. Repülési idő spektrométer elvi felépítése

neutrongenerátor (9. ábra) a kis valószínűségű atommagreakciók vizsgálatára, a gyors hasadássos, valamint a fúziós reaktorok szerkezeti anyagainál és az elektronikus alkatrészeknél fellépő sugárkárosodás tanulmányozására, orvosi diagnosztikai, dozimetriai és terápiai célú kutatásokra, aktivációs és prompt sugárzásos analízisre, továbbá sugárbiológiai vizsgálatok-

ra. Mint kis energiájú, nagy áramú töltött-részecske-gyorsítót a fúziós reaktorok és a nukleáris asztrofizika számára fontos adatok mérésére is kívánjuk használni. Így pl. a fúziós reaktorok tervezéséhez 20 keV alatti deuterone energiánál, illetve a Gamow-energia környékén a D-D, a D-T, valamint a plazma szennyezőin létrejövő reakciók hatáskeresztmetszetét a jelenleginél pontosabban kellene ismernünk. Korábbi ilyen irányú vizsgálatainkban főleg Szabó József, Bódy Zoltán és Várnagy Mihály munkatársaim vettek részt. Az említett neutrongenerátorokat jól egészíti ki két Cf-252 spontánhasadó neutronforrás, amelyeket különböző gyakorlati alkalmazások mellett, hasadási spektrumot szolgáltatató standard neutronforrásként alkalmazunk (10. ábra). A neutrongenerátorokkal és a hozzájuk



9. ábra. A nagy intenzitású neutrongenerátor (építés alatt)

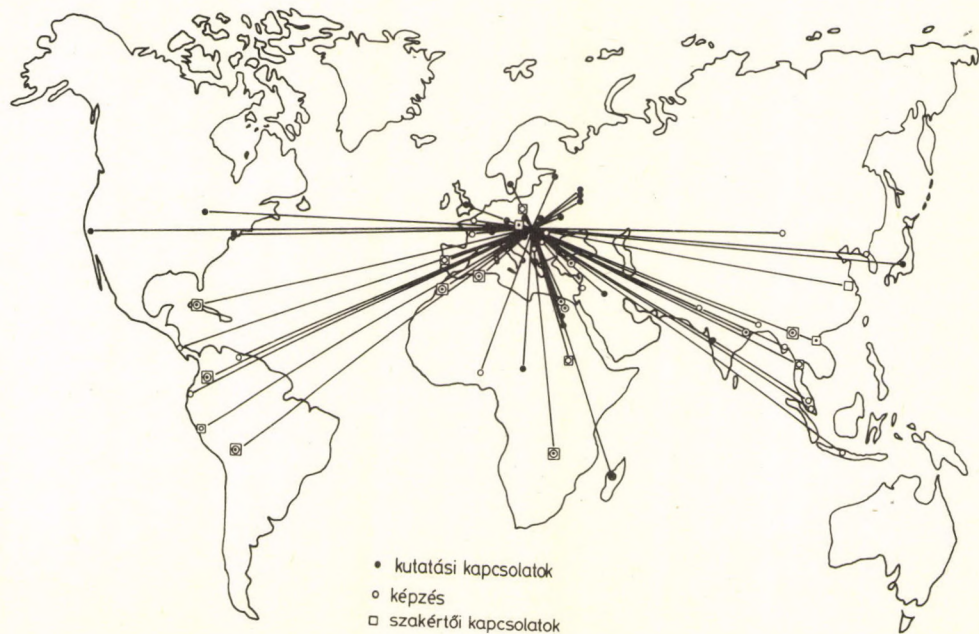


10. ábra. ^{252}Cf neutronforrás vezérlő és besugárzó rendszer

kapcsolódó mérőrendszerekkel elért eredményeink hozzásegítettek bennünket ahhoz, hogy mind a fejlett, mind a fejlődő országok számos intézetével széles körű kapcsolataink alakuljanak ki a kutatás és a képzés terén. Ez utóbbit a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség külön is kiemelten támogatja. A különböző jellegű kapcsolatainkat illusztrálja a 11. ábra.

Rátérve előadásom lényegére: ismeretes, hogy több évtizede jelentős erőfeszítések történnek a szabályozott termonukleáris reaktorok létrehozására, az emberiség rohamosan növekvő energiaszükségletének hosszú távú ki-elégítésére. Mai ismereteink szerint a számításba vehető magreakciók közül a D-T és a D-D folyamatok a legígéretesebbek a fúziós reaktorok megvalósítására. A természetes vizekben lévő deutériumkészletből a D-D reakció révén kb. 3×10^{24} kW h energia termelhető, ami 100 milliószor több, mint amennyit a ma ismeretes fosszilis és hasadóanyag forrásokból előállíthatnánk. A tét tehát „hogya napot pótolni megtanuljuk”. A 12. ábrán a D-D és a D-T folyamatok révén termelt energia látható a hőmérséklet függvényében. A kritikus gyújtási hőmérséklet a két reakciónál $\approx 400 \times 10^6$ K, illetve $\approx 45 \times 10^6$ K, ezért ma mint reális lehetőséggel a D-T plazmával foglalkoznak.

Kérdés, mennyiben járulhat hozzá egy kis ország egyetemi tanszéke — az előzőekben



említett berendezések felhasználásával – az emberiség ezen alapvető problémájának megoldásához?

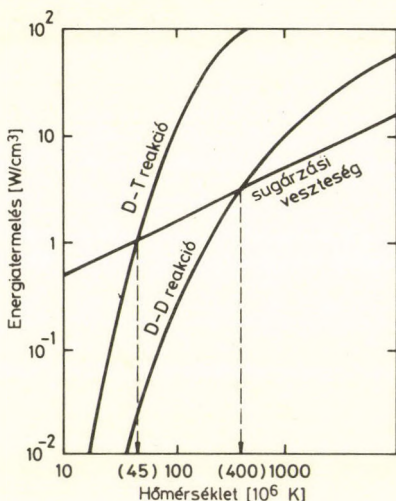
Még a legkedvezőbbnek látszó D-T-Li ciklus esetén is pozitív energiakimenet csak akkor várható, ha a plazma kielégíti az ún. Lawson-kritériumot, azaz ha a plazmasűrűség (n) és az összetartási idő (τ) szorzatára teljesül, hogy $n\tau > 2 \times 10^{14}$ részecske \times s/cm³, $\approx 10^8$ K mellett, ami $T_i \approx 10$ keV ionenergiának felel meg. A plazmából kilépő neutronok energiaeioszlását $T_i = 10, 20$ és 30 keV-nél a 13. ábra szemlélteti. Látható, hogy a fúziós reaktor mint neutronforrás szimulálható egy $100\text{--}200$ kV-os gyorsítóval, és így az energia 80% -át elvivő neutronok további története, a szerkezeti

11. ábra. A KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékének nemzetközi kapcsolatai a kutatás és a képzés terén.

Kutatás: Moszkva, Leningrád, Uzsgorod, Kiev, Obnyinszk, Dubna, Jülich, Osnabrück, Bécs (NAÜ, IRK), Lusaka, Livermore NL, Argonne NL, Brookhaven NL, Orsay Cedex, Chiang Mai, Rabat, Havanna, Bagdad, Asyut, Alexandria, Kairó, Minia, Drezda, Zágráb, Sumen, La Paz, Bogota, Frankfurt, Algír, Ankara, Hanoi, Calcutta, Dacca, Lisszabon, Bratislava, Antananarivo, Lund, Tripoli.

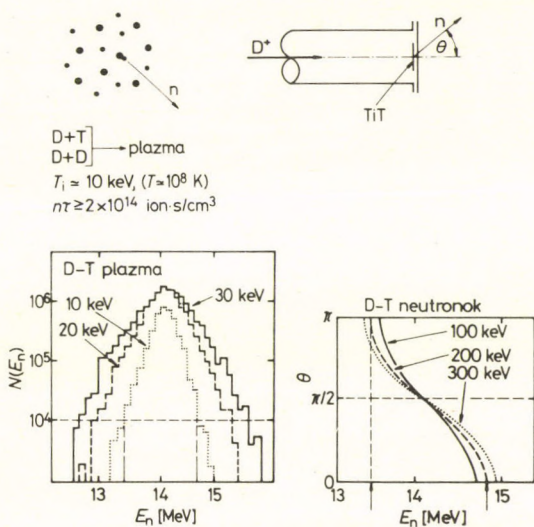
Képzés: Chittagong, Ramná, Rangoon, La Paz, San Jose, Havanna, Quito, Jogyakarta, Beirut, Kuala Lumpur, Rabat, Ile-Ife, Rawalpindi, Singapore, Ankara, Skopje, Lusaka, Bukarest, Szófia, Bogota, San Jose, Algír, Alexandria, Kairó, Pyong Yang, Beirut, Selangor, Lima, Varsó, Sacavem, Chiang Mai, Hanoi, Tripoli.

Szakértői tevékenység: Marokkó, Kuba, Zambia, Peru, Szudán, Vietnam, Thaiföld, Bolívia, Kína, Algéria, Kolumbia, NAÜ, Trieszt (ICTP)

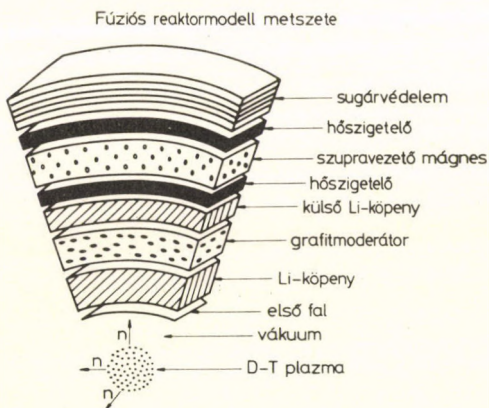


12. ábra. A D-D és a D-T plazmában keletkező energia és a sugárzási veszteség a hőmérséklet függvényében

anyagokkal való kölcsönhatása a plazmafizikai- vagy a lézerfúziós kutatásokkal párhuzamosan tanulmányozható. A 14. ábrán egy fúziós reaktor elvi felépítésének metszete látható. A tervezéshez olyan atom- és magfizikai adatok mérhetők meg, illetve olyan technológiai információk nyerhetők, mint pl. a trícium újratermelése és kinyerése a köpeny anyagából, neutronsokszorozás és -reflexió, a szerkezeti anyagok sugárkárosodása, radioaktív hőleadás az első falban és a szupravezető mágnesekben, plazmaszennyeződés, sugárvédelem, izotóptermelés. Kísérletek folynak a fúziósfissziós hibrid reaktorok létrehozására, amely-



13. ábra. A D-T plazmából származó és a kis neutrongenerátorokkal előállítható neutronok energiatartománya



14. ábra. Fúziós reaktor elvi felépítésének metszete

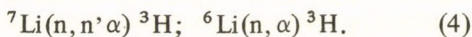
I. táblázat A fúziós reaktor szerkezeti anyagai

Felhasználás	Anyagtípus
Az első fal és a köpeny összetevői	Ausztenites acélok (Fe, Cr, Ni, Mn, Mo, Ti, C) Nikkel alapú ötvözetek (PE 16) Inconel, Incoloy (Ni, Cr, Mo, Nb, Fe, Si, Al, Mn, C, S, P stb.) Hőálló fémek: V, Nb, Mo vagy ezek ötvözei Ti, Zr, Cr alkalmazásával Színterelt alumíniumtermékek, szilícium-karbid, grafit
Reflektor, moderátor	Grafit, D ₂ O
Neutronsokszorozás	Be, BeO
Tríciumtermelés	Li, Li ₂ O, Li ₂ Al ₂ O ₄ , Li-Al, LiF, BeF ₂
Sugárvédelem	B, B ₄ C, Pb, ausztenites acél
Elektromos szigetelés	Al ₂ O ₃ , MgO, Y ₂ O ₃
Hőszigetelés	Mylar, hidrokarbonátok
Szupravezető stabilizáló	Cu, Al
Szupravezető mágneshuzal	NbTi, Nb ₃ Sn, V ₃ Ga
Redox párok	CeF ₃ /CeF ₄ , UF ₃ /UF ₄
Lézeroptika	Ablak: Ge, GaAs, CdSe Tükör: Al, Al-Ni, Be-Ni, Be-Cu

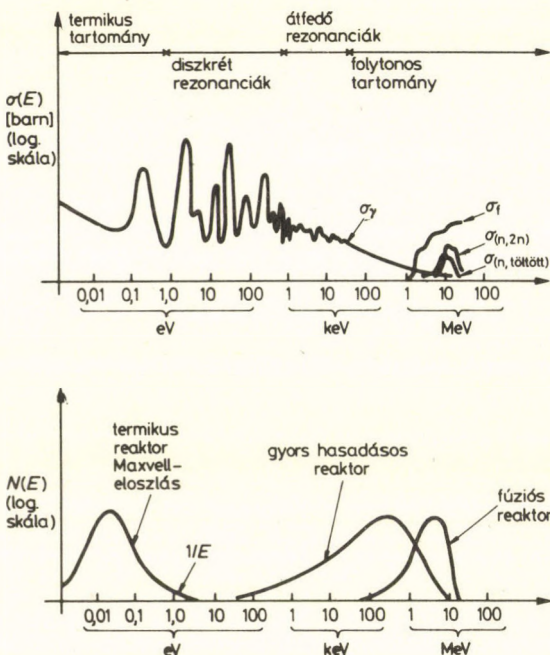
nél a $10^{12} - 10^{14}$ n/s intenzitású plazmaneutronok katalizálnák a hasadási ciklust, vagyis két szubkritikus rendszer képezné a reaktort. Az ilyen rendszerek tervezéséhez a már említett adatokon túl a neutronok lassulását, diffúzióját és reflexióját kell vizsgálni heterogén rendszerekben, továbbá a maghasadás és az atomtenyésztés jellemző paramétereit széles energiatartományban.

Amint azt az I. táblázat adatai mutatják, az elemeknek mintegy egyharmada jön számításba a fúziós reaktor szerkezeti anyagaként.

Mivel a trícium a természetben stabilis állapotban nem fordul elő, így azt a plazmát körülvevő – a tervek szerint lítium – köpenyben kell előállítani, amelyben a kétlépcsős magreakció révén egy elhasznált neutron elvben két tríciumatomot is termelhet, vagyis a konverziós faktor >1 lehet:

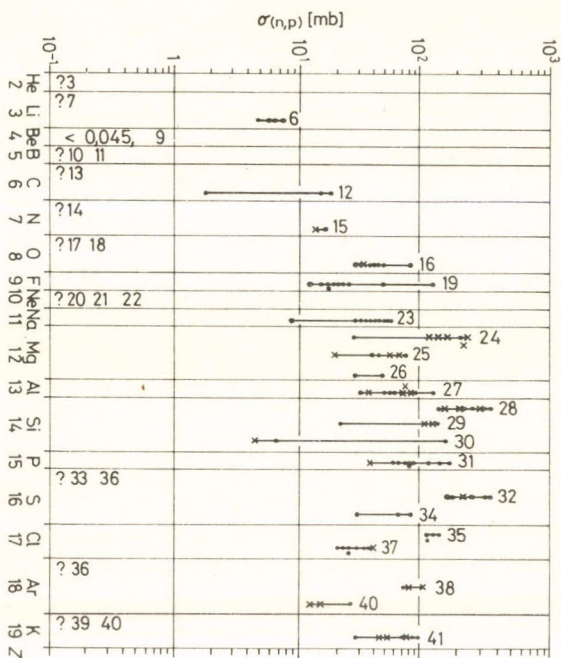


Ha ismernénk a hatáskeresztmetszet energiafüggését, a $\sigma(E)$ -t, az összes lehetséges folyamatra a szerkezeti anyagoknál, továbbá a neutronfluxus hely- és energia szerinti eloszlását, a $\Phi(E, \vec{r})$ -t, a fúziós reaktor különböző részeiben, akkor a tervezés egyszerűen egy számítógépi feladattá válna. A 14 MeV energiával induló neutronok által létrehozható atommagreakciók gerjesztési függvényének kielégítő



15. ábra. Tipikus $\sigma(E_n)$ függvényalakok és különböző reaktortípusok neutronenergia-spektruma

pontosságú meghatározásához egyetlen reakciónál is kb. 10 ezer mérési adatra lenne szükség. Mivel a szerkezeti anyagokat alkotó elemek nagyobb része sok izotópból áll, ezért a tervezések mintegy 10 millió adatot igényelnének. A fúziós reaktorokban amint az a 15. ábrán is látható, a neutronok energiája közelítően néhány 100 keV és 14 MeV közé esik, vagyis a diszkrét rezonanciák fölé, ezért a



16. ábra. Különböző szerzők által közölt (n, p) reakció-hatáskeresztmetszetek a könnyű elemek azonos izotópjainál.

(A pontok a régebbi, az x-ek az újabb adatokat jelölik, a ? feletti számok pedig azokat az izotópokat, amelyekre nincs mért adat.)

$\sigma(A, E)$ függvények meghatározásához jelentősen kevesebb mérési adat is elegendő. A problémát az okozza, hogy a rendelkezésre álló adatok még 14 MeV környékén is igen hiányosak és nagy szórást mutatnak, függetlenül attól, hogy régiek vagy frissek (16. ábra). Ezért tűztük ki kutatási célul a gyorsneutron-hatás-

keresztmetszetek szisztematikus mérését, az irodalmi adatok feldolgozását, különböző szisztematikák ellenőrzését és újabbak felismerését, majd ezek félempirikus vagy tiszta elméleti leírását. Ezen vizsgálatok egy része, az utóbbi 10 évben az obnyinszki intézettel együttműködésben folyik, és így lehetőségünk van a 14 MeV körüli energiákon kívül 1–11 MeV tartományban is méréseket végezni. A közelmúltban Debrecenben üzembe helyezett ciklotron felhasználásával még tovább növelhetjük az energiatartományt. Kutatásainkkal bekapcsolódtunk abba a — Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által koordinált — programba, amelynek célja egyrészt, hogy a felhasználók részéről beérkezett több mint 1500 igényt a résztvevő neutronfizikai laboratóriumok között felosztva mielőbb kielégítse, másrészt, hogy standard eljárásokat ajánljon a különböző neutronadatok mérésére a konzisztensebb adatbankok létrehozásához. A standard mérési módszerek javaslatomra, három területen kerülnek kidolgozásra:

a) Integrális reakció-hatáskeresztmetszetek:

$$\sigma_{(n, x)}.$$

b) Differenciális, rugalmas szórási, none-lasztikus és neutronemissziós hatáskeresztmetszetek:

$$\frac{d\sigma_{EL}(\theta)}{d\Omega}, \quad \sigma_{NE}, \quad \sigma_{nM}.$$

c) Kétszeres differenciális hatáskeresztmetszetek neutron- és töltöttreszecske-emisszióra (azaz az energiaspektrum a szög függvényében):

$$\frac{d\sigma_{(n, xn')}(\theta, E)}{d\Omega dE}.$$

A különböző szerzők által 14 MeV körül mért adatokban tapasztalt nagy eltéréseket – különösen a magas küszöbű reakciónál – részben a neutronok irány szerinti energiájának és hozamának pontatlan ismerete okozza. A D-D és D-T reakciókból származó neutronok hozama és energiája az emisszió szögétől és a deutériumion energiájától függ. Ezekre a közelmúltban sikerült egyszerű analitikus összefüggéseket adnunk vékony és vastag targetre, az $E_d = 20 - 500$ keV tartományban:

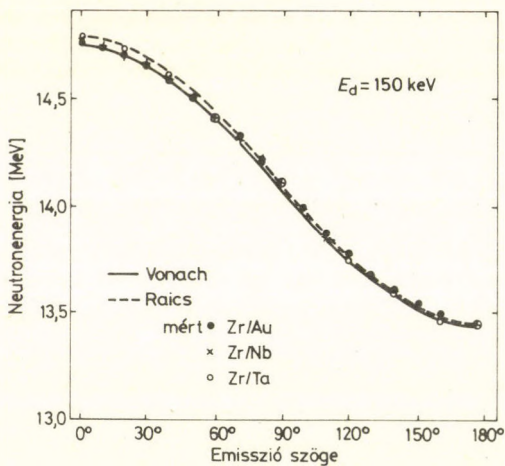
$$Y(E_d, \theta) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos^i \theta, \quad (5)$$

ahol $n=5$ és 3 a D-D, illetve a D-T reakciókra;

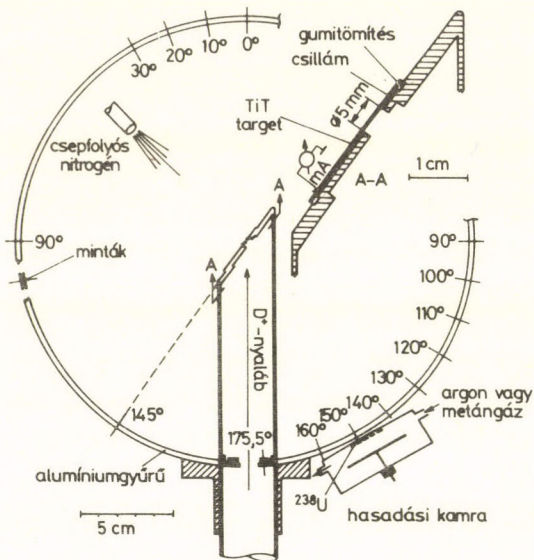
$$E_n(E_d, \theta) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \cos^i \theta, \quad (6)$$

ahol $n=3$ és 2 a D-D, illetve a D-T reakciókra.

Az A_0 , A_i , E_0 és E_i koefficiensek értékeit kísérletileg ellenőriztük és táblázatosan meg-

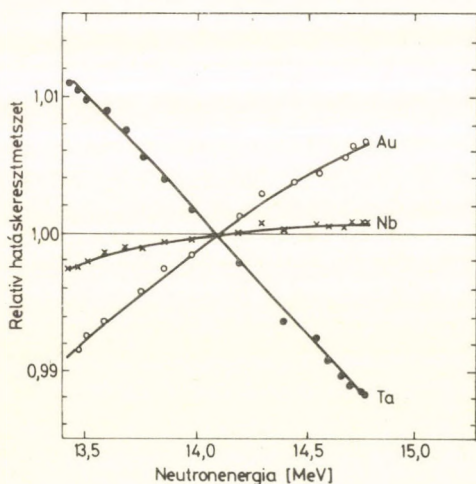


17. ábra. A mért és számított $E_n(\theta)$ függvények 150 keV deutronenergiánál

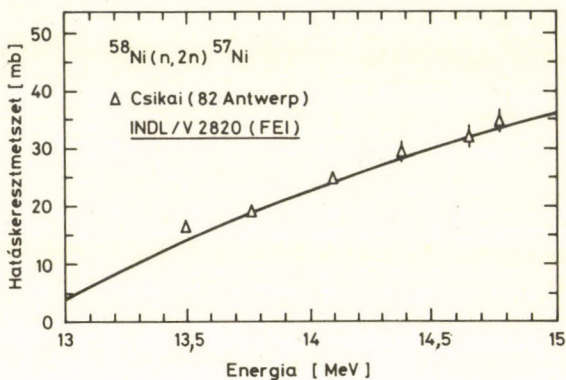
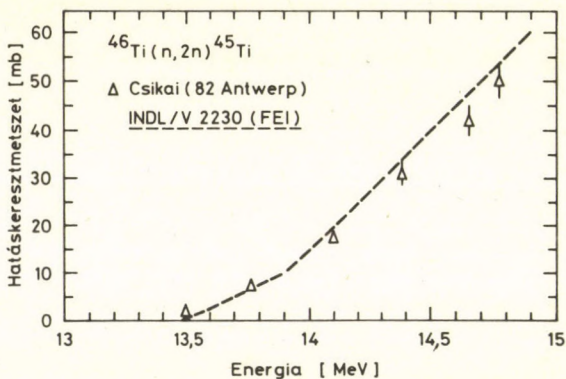


18. ábra. Szórásmentes elrendezés a neutronhozam energia- és szögfüggésének, valamint a hatáskeresztmetszetek mérésére

adtuk, továbbá összehasonlítottuk a relativisztikus és nemrelativisztikus számításokkal (17. ábra). A kísérleti elrendezést, ami egyben az integrális hatáskeresztmetszetek mérésére is szolgál, a 18. ábra szemlélteti. A módszer pontosságát néhány $(n, 2n)$ reakció relatív gerjesztési függvénye illusztrálja, amelyeknél 1%-on belüli változást is sikerült kimutatni (19. ábra). Az abszolút hatáskeresztmetszetek pontossága rosszabb és több esetben nem egyezik a különböző nemzetközi adatbankok ajánlásaival (20a, 20b, 20c ábra). Különösen vonatkozik ez az $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ reakcióra. Az $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ reakció viszont, a gerjesztési függvényében 14 MeV körül észlelt lépcső mi-



19. ábra. A $\sigma_{(n, 2n)}(E_n)$ függvény relatív változása a Nb, Au és Ta fluxusmonitorokra

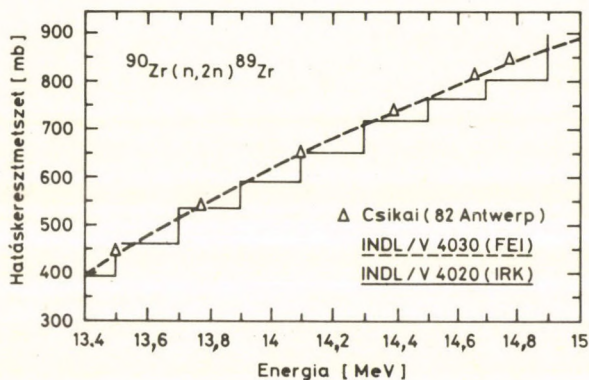
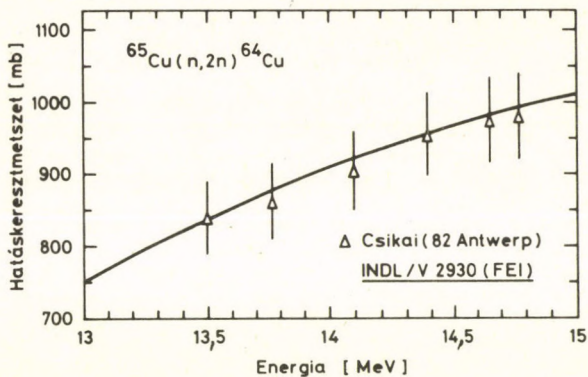


20a ábra

att, hatáskeresztmetszet standardként használható (21. ábra).

Ezen vizsgálataink célja a következőkben foglalható össze:

1. a relatív gerjesztési függvényekhez abszolút referenciaadatok szolgáltatása;

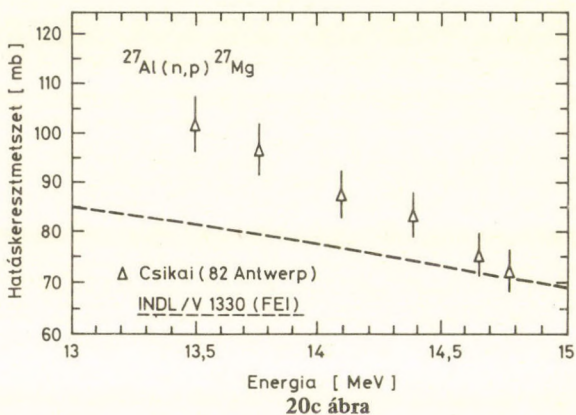
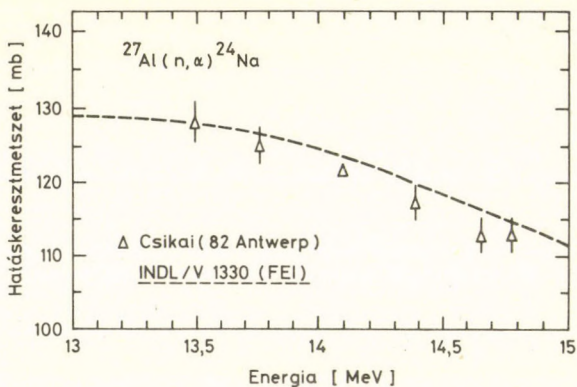


20b ábra

2. a nemzetközi adatbankok ajánlásainak ellenőrzése;

3. a különböző empirikus szisztematikák érvényességi tartományainak megállapítása;

4. a különböző magreakció modellek alkal-

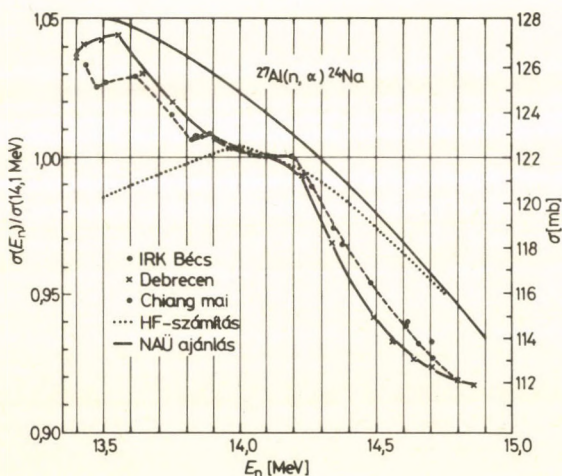


20a, 20b, 20c ábra. Néhány (n, 2n), (n, α) és (n, p) reakció mért és különböző adatbankok által ajánlott gerjesztési függvényei. (A kiértékelést a NAÜ végezte el.)

mazhatóságának ellenőrzése pontos mérési adatok alapján;

5. adatok szolgáltatása a fúziós reaktorok tervezéséhez, lehetőleg analitikus függvények formájában.

Ez utóbbit egy példával szeretném illusztrálni. A tehetetlenségi elven működő fúziónál pl. egy kvarc mikroballonba lefagyasztott deuterium-trícium gázkeverékre lézersugarakkal, néhányszor 10^{-9} s alatt kb. 10^5 J energiát adnak le. Az így létrejött fúzióból származó neutronok a kvarcban lévő szilíciumot a



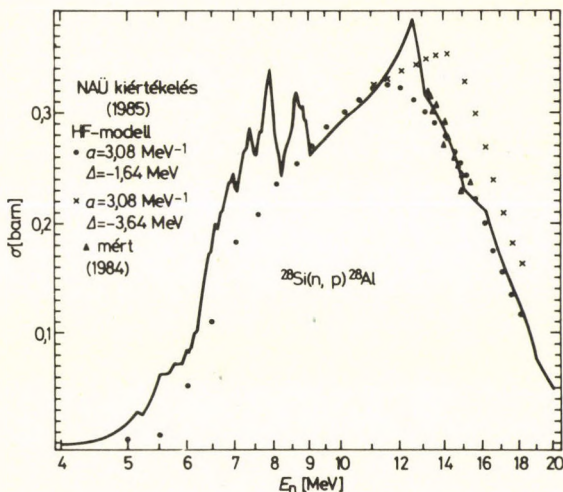
21. ábra. Az $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ reakció gerjesztési függvényére a különböző laboratóriumokban kapott adatok, összehasonlítva a Hauser–Feshbach-modellszámítás eredményeivel, 14 MeV környezetében

$^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$ reakció révén felaktiválják. Az aktivitás a Δt ideig tartó fúziós folyamat végén a következő kifejezéssel adható meg:

$$A = n(1 - e^{-\lambda \Delta t}) \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE \simeq n \lambda \Delta t \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE, \quad (7)$$

ahol n a ^{28}Si atommagok száma. Az üveg aktivitását mérve, a $\sigma(E)$ függvény ismeretében az átlagos fluxus és a teljes neutronhozam meghatározható. Mivel a mért és a számított adatok 14 MeV környékén jelentősen eltérnek egymástól, ezért a Lawrence Livermore Laboratórium kérésére az általunk kifejlesztett nagy pontosságú módszerrel megmértük a $\sigma(E)$ függvényt a $^{28}\text{Si}(n, p)$ reakcióra. Az eredményeket, a számított és az ajánlott adatokkal együtt a 22. ábra szemlélteti. A NAÜ legfrissebb kiértékelése tökéletesen egyezik az általunk 14 MeV környékén korábban mért adatokkal. Ugyanakkor látható a nívósűrűség-paraméterek megválasztásának erős hatása a Hauser–Feshbach-modell alapján számolt $\sigma(E)$ függvényre.

Sajnos, jelenleg nincs elfogadható elméleti modell a neutronindukált magreakciók gerjesztési függvényének leírására, különösen az $E_n > 10$ MeV energiatartományban, ahol egymással versengő reakciók jönnek létre. Nehezíti a gerjesztési függvények elméleti leírását



22. ábra. A $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$ reakció gerjesztési függvényére ajánlott (folytonos vonal), mért (háromszög), és a HF-modell különböző paramétereivel számított (pont) adatok

az, hogy az atommagok gerjesztett állapotát jellemző paraméterek egyáltalán nem, vagy csak pontatlanul ismertek. Így pl. a Hauser–Feshbach-modellben az izolált nívók járulékaiknak figyelembevétele, valamint a nívósűrűség-formula megválasztása okoz bizonytalanságot. Ezen modellel számos (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$ és (n, t) reakció gerjesztési függvényére végeztünk Sudár Sándorral számításokat a következő összefüggés felhasználásával:

$$\sigma_{(\alpha, \alpha')} = n\lambda^2 \sum_{J, \pi} \frac{(2J+1) \sum_{sl} T_{\alpha sl}^J \sum_{s'l'} T_{\alpha' s'l'}^J}{(2I+1)(2i+1) D(J, \pi)}, \quad (8)$$

ahol I és i az ütköző részecskék spinértékei, J és π a közbelső mag impulzuszórántuma és paritása. A nevezőben a végmag diszkrét nívóira ($0 \leq E_x \leq E_d$) az összegzés és a folytonos tartományra ($E_d \leq E_x \leq E_m$) az integrálás különválasztva szerepel:

$$D(J, \pi) = \sum_{\alpha' s' l'} \left(\sum_{I' \pi'} \int_{E_d}^{E_m} \rho(E_x, I', \pi') T_{\alpha' s' l'}^J dE_x + \right. \\ \left. + \sum_{E_x=0}^{E_d} T_{\alpha' s' l'}^J \right). \quad (9)$$

A tapasztalat szerint a szabad paraméterek megfelelő megválasztásával a $\sigma(E)$ függvény alakját a HF-modellel jól le lehet írni, de a fionomszerkezetről – amint az a 22. ábrán is látható – nem ad számot.

A totális, az integrális és a differenciális rugalmas szórási, valamint a nonelasztikus hatás-keresztmetszetek energia- és tömegszámfüggését – figyelembe véve a mérések pontosságát – kielégítően le lehet írni mind a kvantummechanikai, mind az általunk alkalmazott félklasszikus optikai modellel. Angeli Istvánal a 0,5–42 MeV energia- és $A > 14$ tömeg-

szám tartományra a következő analitikus összefüggéseket kaptuk, amelyek egyben alkalmasak az ismeretlen vagy pontatlanul mérhető adatok becslésére is:

a) Totális:

$$\sigma_T = \sigma_{BN} [a - p \cos(qA^{1/3} - r)], \quad (10)$$

ahol

$$\sigma_{BN} = 2\pi(r_0 A^{1/3} + \lambda)^2,$$

$$r_0 = 1,4 \text{ fm},$$

$$\lambda = 4,55 E^{-1/2} (A + 1) / A \text{ fm}.$$

b) Elasztikus:

$$\sigma_{EL} = \sigma_{BN} [a + p^2 - 2p \cos(qA^{1/3} - r)]. \quad (11)$$

c) Nonelasztikus:

$$\sigma_{NE} = \sigma_{BN} (a - p^2). \quad (12)$$

d) Differenciális elasztikus:

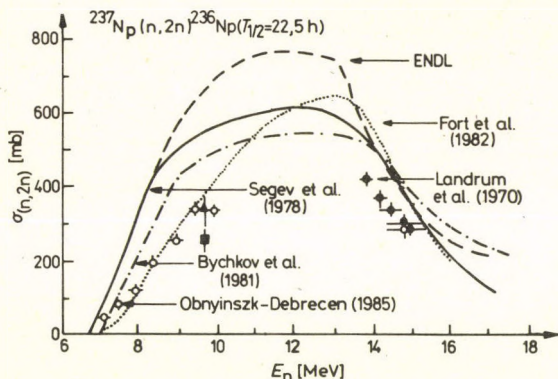
$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} = & \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 [a + p^2 - 2p \cos(qA^{1/3} - r)] \times \\ & \times \left| \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) P_l(\cos \theta) \right|^2, \end{aligned} \quad (13)$$

ahol

$$l_{\max} = r_0 (A) A^{1/3} / \lambda$$

A (10), (11), (12) és (13) kifejezésekben az a , p , q és r paraméterek azonosak és fizikailag értelmezhetők. Ezen vizsgálatok során kimutattuk, hogy könnyű magok esetén egyértelmű kapcsolat van a nukleonok átlagos kötési energiája (ϵ) és az atommag sugara (r_0) között: $\epsilon \cdot r_0 = \text{állandó}$. Egy további elemzés kapcsán Angeli István munkatársam vette észre, hogy a mag töltéssugara nemcsak a tömegszámtól, hanem a héjszerkezettől is függ.

A nonelasztikus hatáskeresztmetszetet alkotó atommagreakciók esetén sikerült ugyan néhány szabályosságot felismernünk, így pl. az $(n, 2n)$ reakciók hatáskeresztmetszetének $N-Z$ függését, vagy az (n, t) reakcióknál az igen szignifikánsan jelentkező páros-páratlan effektust, de eddig még nem vezettek eredményre azok a próbálkozások, amelyeknek célja, hogy az ún. parciális hatáskeresztmetszetek leírására olyan egyszerű analitikus összefüggéseket adjunk meg, amelyeket a felhasználók igényelnének, illetve amelyeket a fenti kifejezésekhez hasonlóan fizikailag értelmezni tudnánk. A különböző atommagreakció modellek alkalmazhatóságának ellenőrzését elsősorban a mért adatok hiányossága és pontatlansága korlátozza. Jól illusztrálják ezt pl. az atomenergetikai szempontból is fontos $^{237}\text{Np}(n, 2n)^{236}\text{Np}(s)$ reakció gerjesztési függvényére vonatkozó mérések és kiértékelések (23. ábra), amely vizsgálatokat az obnyinszki kutatókkal együtt végeztük. Itt jegyzem meg,



23. ábra. A $^{237}\text{Np}(n, 2n)$ reakció gerjesztési függvényére vonatkozó ajánlások, valamint a saját és mások által mért adatok

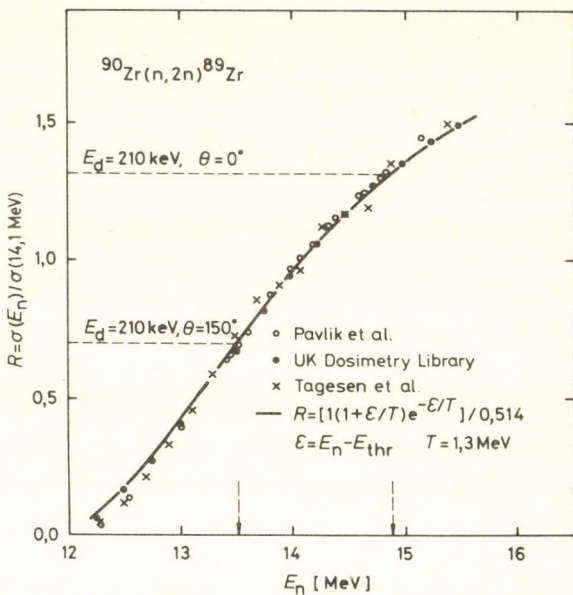
hogy a 8–12 MeV energiatartományban a gerjesztési függvényekre különösen kevés mérési adat van.

Az $(n, 2n)$ reakció szisztematikus vizsgálatát éppen azért végeztük, mert a közepes és nehéz magoknál ez adja a nonelasztikus hatáskeresztmetszet kb. 80%-át, és így remény van arra, hogy az atommag azon tulajdonságait ismerjük meg, amelyek a magreakciókat szabályozzák. Ezen vizsgálataink szerint az $(n, 2n)$ gerjesztési függvények inflexiók pontjaihoz tartozó hatáskeresztmetszet-értékek adott proton szám (Z), vagy neutronsám (N) esetén $(N-Z)$ szimmetriaparaméter függők. A Pető Gábor munkatársammal együtt felismert szisztematika a következő:

$$\sigma(Z \pm \Delta Z, N) = [\sigma(Z, N) \pm m(E_{\text{ex}}) \Delta Z] \text{ mb}, \quad (14)$$

ahol $m(E_{\text{ex}}) = 231$, ha $E_{\text{ex}} = 3 \text{ MeV}$ (a küszöb feletti többletenergia).

A $\sigma_{(n, 2n)} - (N - Z)$ függvény értelmezésével több kutató, illetve kutatócsoport foglalkozott, különböző modellek alkalmazásával, de a szabad paraméterek megválasztását eddig fizikailag nem sikerült indokolniuk. Az empirikus sziszematika alapján ugyanakkor Bődy Zoltánnal együtt megadtuk a természetes ele-



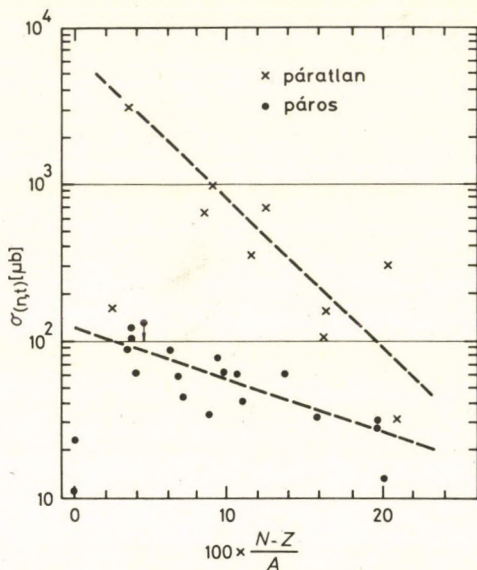
24. ábra. A $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$ reakció mért és számított gerjesztési függvénye

mekre a teljes $\sigma_{(n, 2n)}$ hatáskeresztmetszete-
ket, így a gyors hasadáson és a fúziós reaktoro-
k szerkezeti anyagaira a neutronsokszor-
ozási tényezők rendelkezésre állnak. Ezek
egyben tetszés szerinti energiára is megadha-
tók, minthogy az utóbbi években igazoltuk,
hogy a gerjesztési függvény alakját $(n, 2n)$ re-
akcióknál a Weisskopf-formula jól közelíti az
 $(n, 3n)$ küszöb alatt; amint az a 24. ábrán lát-
ható a $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$ gerjesztési függvény
esetén. Az abszolút gerjesztési függvények
kísérleti ellenőrzésére jó lehetőséget ad a
 ^{252}Cf -től eredő standard spektrum alkalma-
zása. Az ún. aktivációs küszöbdetektorra ka-
pott átlagos hatáskeresztmetszet $\langle\sigma\rangle$ érté-
kek alapján a

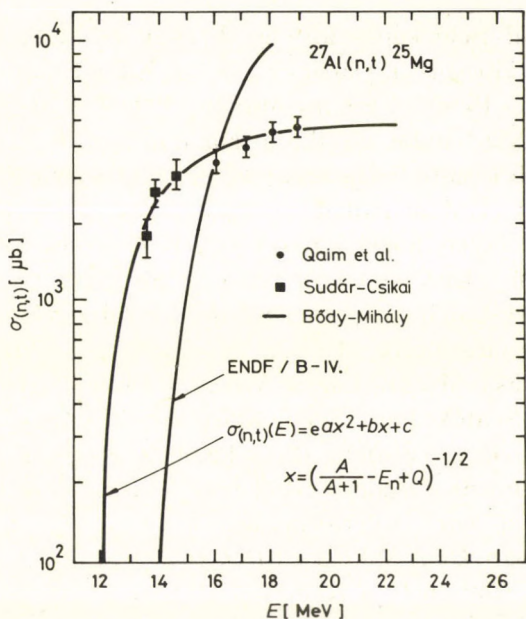
$$\langle\sigma\rangle = \int_0^{\infty} N(E) \sigma(E) dE \quad (15)$$

összefüggés felhasználásával, az $N(E)$ spekt-
rumalak ismeretében a $\sigma(E)$ ellenőrizhető. Szá-
mos olyan reakcióra végeztünk méréseket De-
zső Zoltánnal, amelyek a fúziós reaktorokhoz
és a spektrumalak meghatározásához szüksé-
gesek. Megállapítottuk egyben, hogy a ^{252}Cf
spontán hasadási neutronspektrumát a 2,5–15
MeV energiatartományban $T = 1,41 \pm 0,02$
MeV hőmérsékletű Maxwell-eloszlással jól le-
het közelíteni. A szórásmentesség biztosítá-
sára a forrást és a mintákat az épület felett ki-
feszített vékony dróthuzalon helyeztük el.

Ezen vizsgálatok alapján is megállapítottuk, hogy a nemzetközi adatbankok ajánlásai finomításra szorulnak. Különösen jelentősek az eltérések a tríciumtermelő reakciók adataiban. Az (n, t) reakciónál ezért az olyan szisztematikák felismerése mint pl. a $\sigma_{(n, t)} - (N-Z)/A$ függésben Sudár Sándor munkatársammal tapasztalt páros-páratlan effektus (25. ábra), vagy a gerjesztési függvény leírására alkalmazott empirikus analitikus összefüggés (26. ábra) különösen fontos. Az ábra egyben jól szemlélteti a neutronenergia pontos ismeretét-



25. ábra. A $\sigma_{(n, t)}$ értékek függése a céltárgy atommagban lévő páros vagy páratlan nukleonszámtól



26. ábra. A $^{27}\text{Al}(n,t)^{25}\text{Mg}$ reakció gerjesztési függvényére kapott kísérleti adatok összehasonlítva az ajánlott és empirikus összefüggés alapján nyert értékekkel

nek jelentőségét. Az (n, t) reakció szisztematikus vizsgálatában még Bíró Tamás, Bődy Zoltán, Mihály Katalin, Vas László és Cserpák Ferenc kutatók vettek részt.

A jelen előadásban nem térek ki az $(n, ^3\text{He})$, $(n, 2p)$, (n, γ) ún. alacsony hatáskeresztmetszetű reakciókkal, továbbá a maghasadással kapcsolatos széles körű kutatásainkra, mivel ezek a fúziós reaktorok problémáihoz közvet-

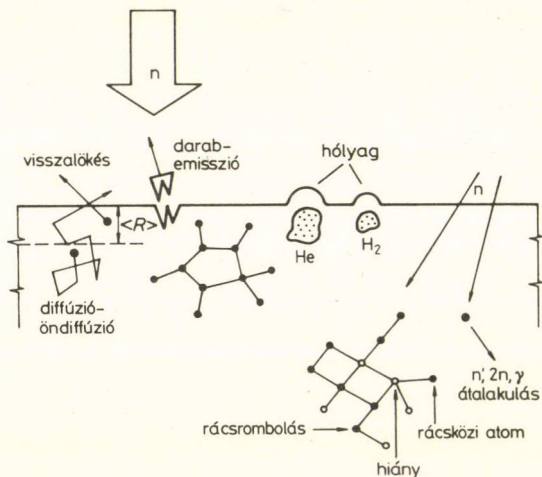
lenül nem kapcsolódnak. Ezeket a kutatásokat elsősorban Daróczy Sándor, Nagy Sándor, Raics Péter, Várnagy Mihály, Pető Gábor és Juhász Sándor munkatársaikkal és több külföldi kutató bevonásával végeztük. Úgyszintén nem érintem azokat a vizsgálatokat, amelyeknek célja, hogy a reaktorszerkezeti anyagok főbb elemösszetevőit és a szennyezők koncentrációját roncsolásmentes módszerekkel meghatározzuk. Ebben a munkában főleg Buczkó Margit, Pázsit Ágnes, Váradi Magdolna, Szalóki Imre, Szegedi Sándor, Juhász Sándor, Dezső Zoltán, Raics Péter és Sailer Kornél munkatársaikkal vettek részt. A neutrongázfizika terén folyó vizsgálatok, amelyek elsősorban Dede Miklós és Demény András nevéhez fűződnek, a termikus atomreaktorok továbbfejlesztéséhez szolgáltatnak új adatokat, különösen az áram-albedo mérésére kidolgozott módszer révén. Több kísérleti és elméleti vizsgálatot végeztünk a fúzióból származó primer neutronok ún. gyengítési (removal) hatáskeresztmetszetének meghatározására mind az aktivációs, mind a repülési idő spektrométer (TOF) felhasználásával. A gyengítési hatáskeresztmetszet értékeit főleg a fontosabb szerkezeti és sugárvédő anyagokra határoztuk meg. Ezeket a vizsgálatokat Vasváry László, Pető Gábor munkatársaikkal és néhány külföldi kutató közreműködésével végeztük. Definíció szerint a gyengítési hatáskeresztmetszetet a következő összefüggés adja:

$$\phi(r) = \frac{Q}{4r^2\pi} e^{-\Sigma(r-r_0)}, \quad (16)$$

ahol Σ a makroszkopikus removal hatás keresztmetszet, Q a forrás intenzitása, és $r-r_0=d$ az árnyékoló teljes vastagsága.

Befejezésül megemlítem még a gyors neutronok okozta sugárkárosodással kapcsolatos vizsgálatokat. A fontosabb folyamatokat a 27. ábra szemlélteti.

Számos hidrogén- és héliumtermelő reakció hatás keresztmetszetét mértük meg, mivel ezen gázok felhalmozódása üregek képződéséhez vezet a szerkezeti anyagokban. A közvetlen ütközés vagy magreakció révén az atomok az anyag felületéből kiszakadnak. Több magreakció esetén meghatároztuk a visszalökött atommagok hatótávolságát, amelyek kb. a 10–1000 nm tartományba esnek $E_n \approx 14$ MeV-nál. A gyors neutronok révén lehetőség nyílik a szennyezők homogén és igen kis koncentrációjú bevitelére a különböző anyagokba, és ezen keresztül az idegen és a saját atom diffúziójának vizsgálatára, az ötvözők kipárolgásának tanulmányozására. Példaként megemlítem a nátrium diffúziós koefficiensének és aktivációs energiájának meghatározására kidolgozott módszert alumíniummátrix esetén, mivel az alumínium a fúziós reaktorok egyik fő szerkezeti anyaga. A vizsgálatok elvét a 28. ábra szemlélteti. A sugárkárosodás vizsgálata terén az épülő nagy intenzitású neutrongeneráto-



Mérendő mennyiségek:

1. $D(T)$, D_0 , H
2. $\langle R_f \rangle$, $\langle R_b \rangle$, $\langle R \rangle$
3. Darab (alak, méret, hozam)
4. Átalakulási ütem (gáz, szilárd)
5. Kimozdítási σ_d
6. Specifikus rombolási energia $\langle \sigma_d E_d \rangle$

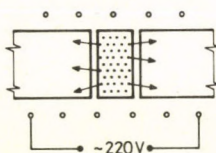
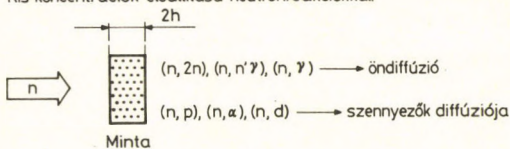
27. ábra. A gyors neutronok okozta sugárkárosodás típusai és a mérendő fizikai mennyiségek

runk és a közelmúltban üzembe helyezett ciklotron számos új lehetőséget nyújt a kutatók számára.

Az előadásomban említett eredmények az alábbi könyvekben, folyóiratokban és konferenciák anyagában kerültek közlésre 1973 óta:

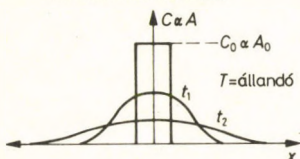
Szennyező és saját atom diffúziója

Kis koncentrációk előállítása neutronreakciókkal:

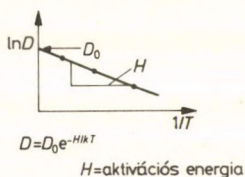
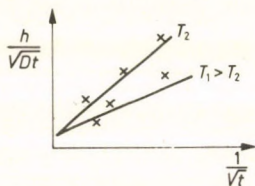


hevítés inaktív anyagok között
 T hőmérsékleten, t ideig

Az aktivitás változása:



$$\frac{\tilde{C}(t)}{C_0} = \frac{A(t)}{A_0}; \quad \tilde{C}(t) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h C(x) dx = C_0 f\left(\frac{h}{\sqrt{Dt}}\right)$$



28. ábra. A diffúziós és kipárolgási vizsgálatok elve

Könyv

Handbook of Fast Neutron Generators.
CRC Press Inc., USA (nyomdában).

Könyvrészletek

Data for 14 MeV Neutron Activation Analysis, in Handbook on Nuclear Activation Da-

ta. IAEA, Vienna (nyomdában). Neutronok és a paleotudományok, „A neutronok szerepe a tudományban és a gyakorlatban” c. kiadványban. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Folyóiratok

Physical Review, Nuclear Physics, Nuclear Instruments and Methods, Atomnaja Fizika, Atomnaja Energija, International Atomic Energy Agency kiadványai, Atomic Energy Review, Acta Physica Hungarica, Neutronnaja Fizika, Nuclear Science and Engineering, Izotóptechnika, J. Inorg. Nucl. Chem., J. Radional. Chem., Acta Physica Slovaca, Int. J. Appl. Rad. Isotopes, Radiochem. Radional. Letters, Annals of Nuclear Energy, Zeitschrift für Metallkunde, Geologie et Energie, Radiochimica Acta, Voproszű Atomnoj Nauki i Tehniki, ATOMKI Közlemények, Nemzetközi konferenciák kiadványai, Reports to the Governments of Morocco, Peru, Viet Nam, Zambia, Cuba, Sudan and Thailand, IAEA TC Reports.

Kutatási programunk kialakításánál abból indultunk ki, hogy egy egyetemi tanszéken a fiatal szakemberek magas szintű képzése sokkal inkább igényli az oktatóktól a képzelőerőt, ötletességet, az egyetemi laboratóriumoktól pedig a sokoldalúságot mintsem a bonyolult nagy berendezéseket, amelyeknél az oktatás vagy a kutatás műszercentrikussá

válhat. A fúziós reaktorok kidolgozása terén számos olyan probléma merül fel, amelyek megoldásához még az egyszerű eszközökkel rendelkező kutatóhelyek is érdemlegesen hozzájárulhatnak. Az egyszerűség nem jelenti a téma korszerűtlenségét, de még kevésbé jelentheti azt, hogy ezek a kutatások nem igényelnek anyagi támogatást.

A támogatások forrásaira (MM, MTA, NAÜ, OMFB) már utaltam, segítségüket e helyen is szeretném megköszönni. Hasonlóan hálás köszönettel tartozom a KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékén dolgozó minden munkatársamnak és mindazon hazai és külföldi szakembereknek, akik kutatási programunkhoz kapcsolódva egy egységes kollektíva tagjaként önzetlenül segítették a munkámat és döntően hozzájárultak az említett eredmények eléréséhez.

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó és Nyomda főigazgatója

Felelős szerkesztő: Sente László

A tipográfia és a kötéster Lölbin Judit munkája

Műszaki szerkesztő: Kiss Zsuzsa

Terjedelem: 2,56 (A/5) ív

HU ISSN 0236-6258

16582 Akadémiai Kiadó és Nyomda

Felelős vezető: Hazai György

